

## 고효율 재귀 반사체 형상에 관한 연구

소범식\*, 정용호\*\*, 이득우\*\*

### A Study on the Shape of Efficient Retroreflective Articles

Bum-Sik So\*, Yoong-Ho Jung\*\*, and Deug-Woo Lee\*\*

#### ABSTRACT

Retroreflective article is different from other reflecting objects as it returns the incidence ray to the near of its source. This characteristic makes the retroreflectors have many applications in reflective highway signs, reflective vests, and other safety-related items. These articles may have various shapes. However, the quantitative evaluation of performance for the best shape of retroreflector needs much time and cost for manufacturing prototypes and for performance experiments. In this work, we have developed a program for simulating the trace of ray entered into a retroreflective element, in order to determine the optimal shape of retro-reflection. We have also proposed new performance criterion of retroreflective articles, which can consider the range of incidence angle, instead of the criterion with the merely retroreflective strength.

**Key Words** : cube corner (육각모), reflective sheet (반사지), optimal shape (최적형상), simulation (모사)

#### 1. 서론

최근 차량의 증가에 따라 야간 주행의 사고를 줄이기 위해, 야간에 곡률이 심한 도로의 상태 또는 도로 상의 각종 안내 표식 등을 운전자에게 인식 시켜야 할 필요가 있다. 이를 위해 주행중인 차량의 전조등 빛을 이용하여 표지판의 내용을 운전자에게 알려주는 방법으로서 반사체의 표지판을 이용하는 것이 보편화되어 있다. 이러한 반사체는 운전자 또는 주행 차량의 위치와 무관하게 항상 운전자의 위치 근방으로 빛을 되돌려 주는 특성이 필요한데, 이와 같이 광원의 위치와 무관하게, 광원의 위치 근방으로 빛을 반사시키는 특성을 재귀 반사 (retroreflection) 라고 한다.

이러한 재귀 반사를 구현하기 위한 반사체의 구조에는 크게 두 가지 종류가 있는데, 유리구슬을 조밀하게 배열시켜 재귀 반사의 효과를 내는 것과, 정점을 포함하는 변들의 변각이 직각인 사면체 (Cube-corner, 육각모)를 조밀하게 배열시켜 내부 전 반사를 이용하여 재귀 반사 효과를 얻는 것<sup>(1)</sup>이 있다. 이 두 가지 종류의 반사체에 대해 일반적으로 알려진 반사특성은, 전자는 재귀 반사되는 입사각의 범위가 후자보다 더 넓으며, 후자는 전자보다 반사효율이 더 좋은 것으로 알려져 있다<sup>(2, 3)</sup>. 근래에는 재귀반사의 세기와 재귀반사 범위를 동시에 높이기 위해 이 두 가지를 합성한 방법도 제안되었다<sup>(3)</sup>.

한편 이러한 반사체는 최근까지 전량 수입에

2001년 7월 3일 접수

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

의존해왔기 때문에<sup>(4)</sup> 국내에서는 근래에 이르러 개발이 시도되고 있지만, 반사체의 형상에 따른 반사 효율과 특성에 대한 이론적인 연구가 부족하여 반사체 모델의 개발에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 특히 전반사를 이용하는 반사지에서 반사체의 형상 정밀도가 반사지 효율에 매우 민감하다고 알려져 있는데<sup>(5)</sup>, 이에 대한 정량적인 값을 획득하기 위해 수많은 시제품의 제작과 광학적 실험이 필요하며 이 때문에 많은 개발비용과 기간이 요구된다. 본 논문에서는 전반사를 이용하는 반사체에 대해 광학적 실험을 모사하는 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 반사체의 형상에 따른 반사 특성을 비교 평가하여 최적의 효율을 나타내는 반사체 모델을 구하고자 한다.

## 2. 재귀 반사체

야간 주행시 도로의 상황이나 정보를 운전자에게 알려주기 위한 안내 표지판의 경우, Fig. 1 과 같이 자동차의 전조등으로부터의 빛이 표지판에 반사되어 운전자의 위치인 광원 근방으로 가능한 한 많이 반사되어야 한다. 그러나 거울과 같은 반사체를 사용하지 않고 특수한 형상인 재귀 반사체를 사용하는 이유는 재귀 반사체가 차량의 위치, 즉 광원의 위치가 변하더라도 광원의 위치 근방, 즉 운전자의 위치로 반사시켜 주는 특성이 있기 때문이다. 본 장에서는 본 연구에서 목적하는 재귀 반사 시뮬레이션 프로그램 개발을 위해 빛과 재귀 반사의 특성들을 먼저 소개하겠다.

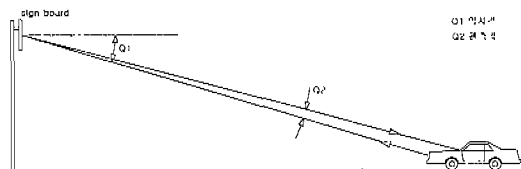


Fig. 1 The use of retroreflectives in the dark

### 2.1 빛의 특성과 재귀 반사체의 종류

재귀 반사의 특성을 모사하기 위해서는 먼저 빛의 굴절율, 흡수율, 그리고 반사 특성이 정의되어야 하겠다. 물리 이론으로부터 빛의 굴절율은 빛이 서로 다른 매질을 투과할 때 투과하는 빛이 꺾이는 정도를 나타내며, 진공상태의 공간에서 굴절율을 1

이라고 할 때 상대적인 값으로 굴절율을 나타낸다. 흡수율은 빛의 파장이 매질을 지나면서 에너지를 빼앗겨 파장이 길어지면서 가시광선 영역에서 사라지는 정도를 말하는데, 일반적으로 투명한 정도를 나타내게 된다. 그리고 Fig. 2 와 같이 빛이 서로 다른 굴절율을 가진 매질에 입사될 때 빛은 항상 ‘반사(reflection)’와 ‘투과(transmission)’의 두 갈래로 나뉘게 된다. 반사는 두 매질의 경계면의 법선에 대해서 입사각과 동일한 크기의 각도로 반사되며, 투과는 굴절율과 입사각의 크기에 따라 꺾이는 정도가 달라지는데 그 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

여기서  $\theta_1, \theta_2$  : 입사각, 투과각

$n_1$  : 매질1의 굴절율

$n_2$  : 매질2의 굴절율

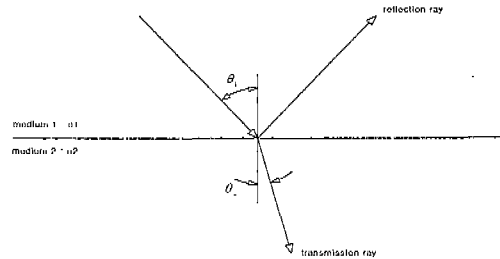


Fig. 2 Light reflection and transmission

특히 굴절율이 큰 매질에서 작은 매질로 빛이 진행할 때는 특정 입사각의 범위에서 반사되는 빛이 100% 이고 투과되는 빛이 0% 인 상태가 있는데 이를 전반사라 한다. 전반사가 일어나는 조건은 다음과 같다.

$$\theta_1 \leq \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \text{ 단, } n_1 > n_2 \quad (2)$$

빛의 세기에 관해서는 프레넬의 전자기파 파동의 진행에 관한 이론<sup>(6)</sup>에 근거한 가시광선의 회파의 거동으로부터 입사각과 굴절율에 대해 다음과 같은 관계가 있다.

매질의 경계면에 수직입사 경우의 반사율

$$= \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (3)$$

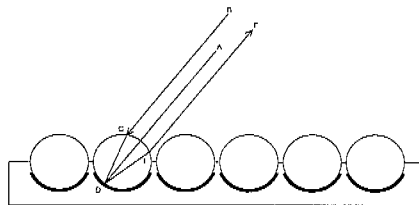
매질의 경계 면에 수평입사 경우의 반사율  

$$= 1.0 \quad (4)$$

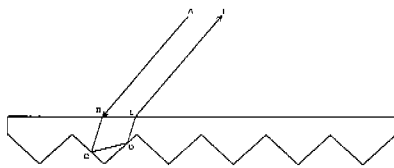
그 외 입사 경우의 반사율  

$$= \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (5)$$

이와 같은 빛의 성질을 이용하여, 광원의 위치가 변하더라도 광원의 위치 근방으로 반사시키는 재귀 반사체의 구조에는 크게 두 가지 종류가 있다. 즉, Fig. 3 (a) 와 같이 유리구슬을 조밀하게 배열시켜 재귀 반사의 효과를 내는 것과, Fig. 3 (b) 와 같이 사면체를 조밀하게 배열시키고 각 사면체 내부에서의 전반사를 이용하여 재귀 반사 효과를 얻는 것이 있다. 유리 구슬을 이용하는 방식의 경우, 유리구슬의 굴절율이 2.0 인 경우, 유리구슬 안으로 굴절되어 온 빛(Fig. 3 (a)의 CD 선분)은 그 법선(Fig. 3 (a)의 DA선분)이 항상 유리구슬의 중심을 통과하도록 구슬 뒷면의 위치(Fig. 3 (a)의 D점)로 향하게 되며, D점에서 거울반사된 빛(Fig. 3 (a)의 DE선분)은 유리구슬 밖으로 나갈 때 다시 굴절되어(Fig. 3 (a)의 EF선분) 재귀반사가 일어나게 된다. 한편, 사면체를 이용하는 방식은 Fig. 3 (b) 와 같이 입사된 빛이 한번의 거울 반사 대신 여러 번 전반사 되어 입사된 방향으로 되돌아가는데, 전반사에서는 이론으로 빛의 손실이 0 (영) 에 가까우므로 거울반사 보다 높은 효율을 보장한다.



(a) sphere type retroreflectives



(b) tetrahedron type retroreflectives

Fig. 3 Types of retroreflectives

최근에는 사면체를 이용하는 방법 중에서 큐브-코너가 아닌 사면체의 형상을 이용하여 반사효율과 반사범위를 동시에 좋게 하려는 시도가 있으며, 현재 상품으로 생산되는 반사체 중에서 최고 수준의 반사체로 평가받고 있는 것들은 모두 이러한 방법으로 적절한 반사체 형상을 채택하여 사용하고 있다.

### 2.2 재귀 반사의 성능

재귀 반사의 성능을 좌우하는 요소에는 반사되는 빛의 세기와 재귀 반사가 가능한 입사각의 범위 등이 있다. 앞의 소절에서 언급한 바와 같이 재귀 반사체는 재귀 반사 효과를 나타내는 작은 형상들을 조합하여 사용하게 되는데, 이러한 재귀 반사체에 입사된 빛이 모두 재귀 반사되는 것은 아니다. 즉, 입사된 빛 중 반사체의 특정 영역에 투사된 빛만이 재귀 반사되는데, 이와 같이 반사체의 전체 면적에 대해 재귀 반사가 일어나는 면적의 비율 ‘유효 면적 비’라고 한다. ‘유효 면적 비’가 클수록 재귀 반사 효율이 좋으며 최대 값은 1 이다. 따라서 반사되는 빛의 세기는 빛의 ‘흡수율’과 반사 ‘유효 면적 비’에 의해 결정되는데, ‘흡수율’은 반사체의 재질과 표면의 가공정도에 좌우되며, ‘유효 면적비’는 반사체의 ‘굴절율’과 형상에 좌우된다.

한편 재귀 반사체는 광원의 위치에 무관하게 광원의 위치 근방으로 입사된 빛을 전량 반사시키는 것을 목표로 하지만, 일반적으로 입사되는 빛의 각도에 따라 재귀 반사되는 빛의 양이 조금씩 변한다. 따라서 특정 재귀 반사체에 대해 재귀 반사되는 광량이 최고 값으로부터 50%까지 줄어드는 입사 각도의 범위를 ‘재귀 반사 범위’라고 정의한다. ‘재귀 반사 범위’가 클수록 임의의 위치에 있는 광원으로부터의 빛을 재귀 반사하므로 좋은 재귀 반사체라고 할 수 있다.

결국 재귀 반사체의 형상에 따라 재귀 반사의 ‘유효 면적 비’와 ‘재귀 반사 범위’가 결정되고 재귀 반사되는 빛의 광량과 재귀 반사가 가능한 입사각의 범위가 결정되므로, 고 효율의 재귀 반사를 구현하기 위해서는 반사체 형상의 결정이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

### 2.3 재귀 반사체의 평가 기준

본 연구의 대상인 도로의 안전 표지판에 사용되는 반사체의 경우, 재귀 반사 효율에 대한 기준이

미국 FHWA 자료<sup>(7)</sup>에 정의되어 있다. 즉, Fig. 4와 같이 반사체를 설치하였을 때, 반사체의 법선 방향에 대해 4° 위치에서 빛을 입사한 후, 4±0.2° 위치에서 되돌아오는 빛의 세기를 측정한다. 이는 실제 도로 상황에서 도로의 표지판으로부터 72 m 거리에 있는 차량의 전조등 빛이 5 m 높이에 있는 안내 표지판을 투사하였을 때, 차량의 전조등 보다 30 cm 높은 위치에 있는 운전자의 눈이 이를 인식하는 경우에 해당한다. 따라서 본 연구에서도 이 기준에 따라 반사체의 성능을 평가하겠다.

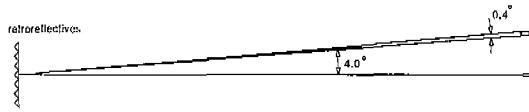


Fig. 4 Evaluation method of retroreflectives

### 3. 재귀 반사 시뮬레이터

#### 3.1 재귀 반사 시뮬레이터의 개발

재귀 반사체의 형상에 대해서는 이미 특허<sup>(8)</sup>로 등록된 것들이 있기 때문에 이러한 특허에 저촉되지 않는 새로운 반사체 형상을 개발하기 위해서는 많은 모델의 제작과 현장 실험이 필요하게 된다. 하나의 모델을 제작하는데도 이를 생산하기 위한 금형의 제작과 시제작 등에 많은 시간과 비용이 들기 때문에, 형상의 변화에 따른 반사 성능을 평가하기 위해서는 많은 노력과 경비가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 방법 대신, 빛의 반사와 굴절 이론으로부터 재귀 반사체의 형상에 따른 빛의 거동을 모사하고, 이로부터 재귀 반사 성능을 비교 평가할 수 있는 시뮬레이터를 개발하고자 한다. 계산의 효율을 위해 먼저 다음과 같은 가정을 하였다.

- 반사체의 표면은 이상적으로 매끄럽다고 가정하여 난반사의 경우는 고려하지 않는다.
- 충분히 많은 수의 광원이 반사체의 법선 방향으로부터 4° 위치에 중심을 둔 사각형 영역 내에 균일하게 존재한다.

- 입사되는 빛은 발산 효과를 고려하지 않는 평행 광원으로 가정한다.
- 반사체로부터 반사되어 나온 빛의 강도가 입사된 빛의 1%보다 적은 경우는 흡수 또는 산란된 것으로 가정하고 그 이후의 효과는 무시한다.
- 굴절률의 계산을 위해, 가시광선의 파장영역 중에서 중앙값 영역인 황색 파장의 빛에 대해 고려한다.
- 빛의 회절은 고려하지 않는다.

이상의 가정으로, 본 연구에서 개발한 시뮬레이터에서는 특정의 반사체 형상에 대해 반사체의 법선 방향으로부터 4° 위치에 있는 각 광원으로부터의 빛이 입사된 후 굴절, 투과, 반사되는 빛의 경로와 강도를 계산하여, 반사체의 법선 방향으로부터 4±0.2° 위치에 되돌아오는 빛의 세기를 계산한다. 이러한 과정을 보다 편리하게 가시화시키기 위해 반사체를 3 차원 공간에 위치시키고, 가정에서 정의된 빛을 입사한 후 반사되는 모든 빛이 반사체의 위치를 중심으로 한 구면의 표면에 도달하였을 때의 강도에 따라 색상으로 표현하도록 하였다. 따라서 측정 위치에서 빛의 반사 세기 뿐만 아니라 빛이 반사체로부터 반사되는 경향을 알 수 있게 하였다.

Fig. 5에 개발된 시뮬레이터를 나타내었는데, Fig.5 (a)의 화면에서는 빛의 거동을 모사하기 위해 모델링한 반사체의 형상을 보여주고 있으며, 상단의 '파일' 메뉴에서는 모델링 형상의 조건들과 시뮬레이션 환경 설정 등을 불러들이거나 저장할 수 있는 기능을 가지고 있다. '시뮬레이션' 메뉴에서는 아래와 같은 기능을 가진다.

- 시작(영역빛) : 반사체에 일정 영역의 빛을 입사시킬 경우의 시뮬레이션 시작
- 시작(단위빛) : 하나의 빛(예를 들면 레이저 광선)을 입사시킬 경우의 시뮬레이션
- 스텝실행 : 하나의 빛이 진행하면서 반사체의 벽에 차례로 부딪힐 때 빛의 진행을 한 단계씩 시뮬레이션
- 치수에 대한 실험 : 반사체의 치수를 설정에서 정해진 만큼 변화시킴에 따른 재귀반사 성능에 대한 그래프를 얻는 기능
- 회전에 대한 실험 : 반사체의 자세를 설정에서 정해진 만큼 변화시킴에 따른 재귀반사 성능에 대한 그래프를 얻는 기능

- 굴절율에 대한 실험 : 반사체의 굴절율을 설정에서 정해진 만큼 변화시킴에 따른 재귀반사 성능에 대한 그래프를 얻는 기능

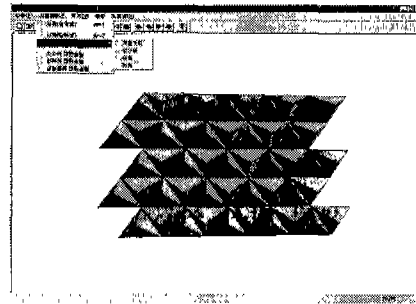
Fig.5 (b)의 '보기' 메뉴에서는 앞에서 설정한 조건에 따라 모사 된 빛의 거동을 나타내는 방법들에 대한 기능들로서 각각에 대한 설명은 아래와 같다. Fig.5 (b)의 화면에 나타난 결과는 '구표면 보기'의 메뉴를 선택하였을 때의 결과이고, Fig.5 (c)의 화면에 나타난 결과는 '빛 경로 보기'의 기능으로 실행하였을 때의 결과이다. 즉 Fig.5 (c)는 모델링된 반사체가 시뮬레이션 공간인 구의 중심에 놓여져 있을 때 입사된 빛이 어떤 경로로 진행하는지를 보여 준다.

- 구 표면 보기 : 반사지에서 발산되는 빛이 맺힌 모습 살펴보는 기능
- 빛 경로 보기 : 빛이 진행되는 경로와 빛의 세기를 화면에 나타내는 기능
- 반사체 프레임 : 반사체를 솔리드/프레임 으로 선택하여 표현하는 기능
- 구면/평면 : 반사지에 발산되는 빛을 구면 혹은 평면에 맺히도록 설정하는 기능
- 거울반사분포 : 거울 반사가 발생하는 분포를 표현하는 기능
- 법선벡터 보기 : 반사지, 집광편의 형상의 법선벡터를 나타내는 기능

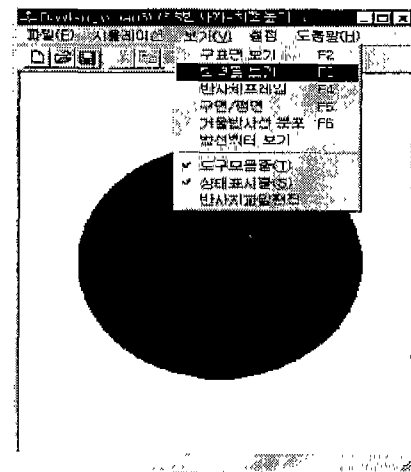
Fig.5 (d)는 시뮬레이션을 위한 전체적인 환경을 설정해 주는 다이얼로그 박스로서 각각에 대한 설명은 아래와 같다.

- 광원위치 : 광원의 위치를 좌표계 상의 위치로 지정
- 광원종류 : 평행광원(태양빛)또는 확산광원(스포트라이트)을 선택
- 카메라 위치 : 빛의 진행 상태를 살펴기 위한 관찰자의 위치
- 반사지 회전 : 반사체의 자세를 설정
- 입사빛 개수 : 시뮬레이션 상에서 반사체로 입사되는 단위 빛의 갯수
- 광선 경로 범위 : 눈에 보여질 광선의 단계를 범위로 지정. (만약 시작값을 0으로 하면 광원에서 빛이 출발하는 위치부터 나타냄)
- 입사빛 과장 분할 : 굴절을 변화에 대한 시뮬레이션을 위해 입사되는 빛의 과장의 분포를 설정

- 배경 반사율 : 반사체 뒷면에 있는 물체에 대한 자체 반사율
- 광도 계산 범위 : 초기 빛의 세기가 1에서 출발하였을 때 빛의 세기가 설정된 값보다 약해지면 빛이 사라진 것으로 가정하여 더 이상 계산을 하지 않음.
- 굴절 깊이 차수 : 빛이 물체에 부딪혀서 굴절과 반사로 나뉘어 진행되는 것을 한 개의 진행차수라 할 때, 시뮬레이션에서 나타낼 이러한 깊이 차수의 허용 범위
- Z높이에 대한 실험, Y길이에 대한 실험 : 반사체 형상의 변화에 따른 시뮬레이션을 위해 반사체의 정점의 위치 변화를 설정
- X축 회전에 대한 실험, Y축 회전에 대한 실험 : 반사체 자세의 변화에 따른 시뮬레이션을 위해 반사체의 자세의 변화를 설정

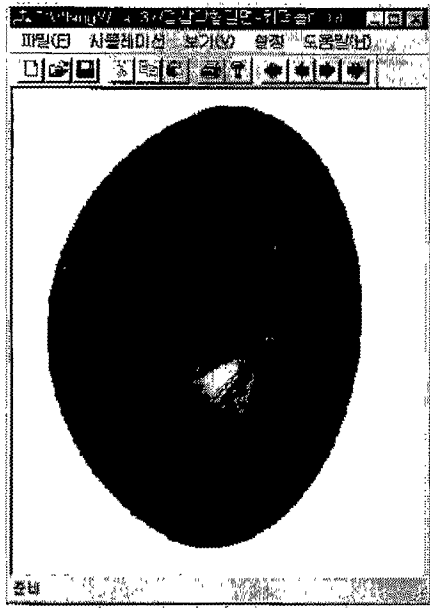


(a) simulation menu

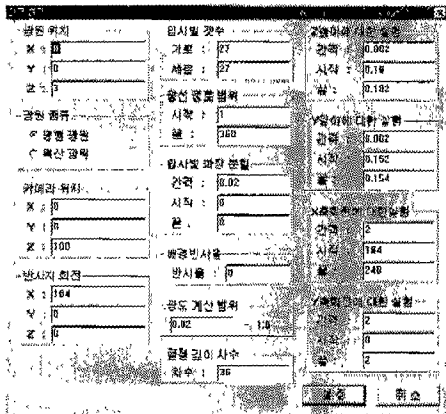


(b) illustration menu and simulation result

Fig. 5 Developed simulator for retroreflektion



(c) simulation result of retroreflection



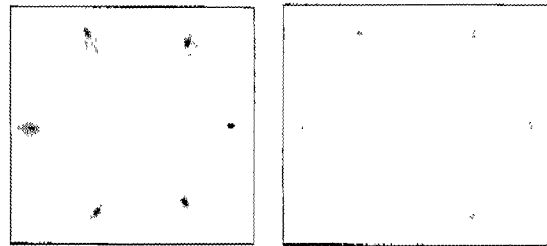
(d) set up menu for simulation conditions

Fig. 5 Developed simulator for retrorefelction

### 3.2 재귀 반사 시뮬레이터의 검증

개발된 시뮬레이터가 실제 광학적 현상을 모사하는지를 검증하기 위하여, 실제 반사체를 통과시킨 빛의 거동과 시뮬레이터에서 모사한 빛의 거동을 비교하였다. 이를 위해 소개의 굴절율이 1.58 이고 밀면이 정삼각형인 사면체의 반사지에 대해 후대용 적색 레이저 빛을 뒷면에서 투과시킨 후,

500mm 거리의 스크린에 맺히는 빛의 거동을 CCD 카메라로 촬영하고, 이것과 동일한 조건으로 모사한 시뮬레이터에서 얻어진 결과를 비교하였다. Fig. 6(a)는 실제 광학적 현상을 CCD 카메라로 촬영한 결과를 나타내며, Fig. 6(b)는 본 연구에서 개발된 시뮬레이터로 모사한 결과를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 실제 반사체를 통과한 빛이 스크린에 맺히는 육각형 무늬의 형상과 크기가 개발된 시뮬레이터의 결과와 동일하였다. 따라서 개발된 시뮬레이터가 실제 빛의 거동을 잘 모사함을 검증할 수 있다.



(a) image pattern from (b) result of simulation tetrahedral retroreflectives

Fig. 6 Verification of developed simulator

## 4. 재귀 반사를 위한 최적 형상

본 장에서는 개발된 시뮬레이터를 이용하여 최적의 재귀 반사체의 형상을 구하기 위해, 형상에 따른 재귀 반사의 세기, 유효 면적비, 그리고 재귀 반사 범위를 고려한 재귀 반사체의 성능을 평가하고자 한다. 다음의 각 소절에서 각 경우에 대한 자세한 내용을 소개하였다.

### 4.1 재귀 반사 강도

본 연구에서 목적하는 최적의 재귀 반사체 형상을 구하기 위해, 먼저 제작이 용이한 다음의 세 가지 형상을 고려한다. 즉, 밀면이 각각 정삼각형과 이동변 삼각형인 사면체와, 밀면이 정사각형인 사각뿔 형상의 반사체에 대해서 꼭지점의 위치에 따라 재귀 반사되는 빛의 강도를 비교하고자 한다. 재귀 반사되는 빛의 강도를 구하기 위한 조건은, 재귀 반사체의 평가 기준인 미국 FHWA 규정에 따라 반사체의 영역 내에 충분히 많은 수 (본 연구에서는 10,000개) 의 평행 광이 입사되게 하고, 반사체의 법선 방향으로부터  $4 \pm 0.2^\circ$  위치에 되돌아오

는 모든 빛의 강도를 합산하도록 하였다.

각각의 경우에 대해 형상의 변화에 따른 재귀 반사 강도를 구하기 위해, 각각의 재귀 반사체의 형상을 Table 1 과 같이 모델링하였다. 그 다음, 모델링된 각각의 반사체의 형상 변화에 따른 재귀 반사 강도를 구하기 위해, 각 반사체의 꼭지점의 위치를 높이(Z) 방향과 길이(Y) 방향으로 변화함에 따라 재귀 반사 강도를 계산하고, 각각의 경우에 대한 결과를 Fig. 7, 8, 9 와 같이 그래프로 나타내었다. Fig. 7, 8, 9의 결과에서 알 수 있듯이, 반사 강도는 꼭지점의 횡 방향의 변화보다 높이 방향의 변화에 따라 더욱 민감하게 변화하였으며, 반사의 강도만을 고려하면 밀면이 정삼각형인 사면체의 경우가 최고의 반사 강도를 나타내었다. 각 반사체의 종류에 따른 최고의 반사 강도를 나타내는 형상을 Table 2 에 정리하였다.

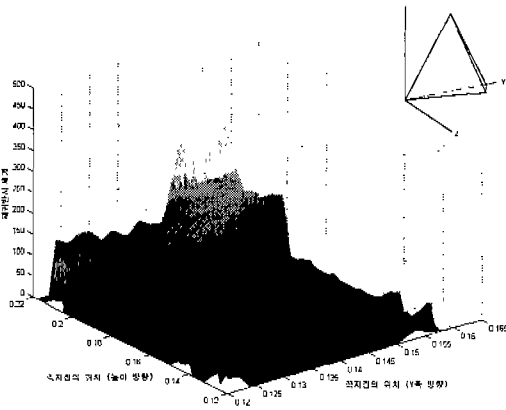


Fig. 7 The intensity of retroreflective light from tetrahedron with regular triangle base

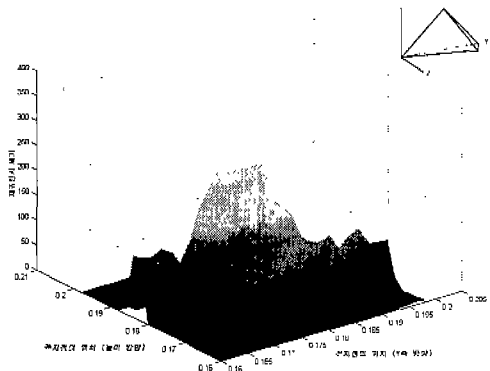


Fig. 8 The intensity of retroreflective light from tetrahedron with equilateral triangle base

Table 1 Dimensions of each type of retroreflectives

반사체 종류	형상	정점 위치	X	Y	Z
밀면이 정삼각형인 사면체		p1	0.0	0.0	0.0
		p2	0.5	0.0	0.0
		p3	0.25	0.433	0.0
		p4	0.25	0.15	0.15
밀면이 이등변삼각형인 사면체		p1	0.0	0.0	0.0
		p2	0.5	0.0	0.0
		p3	0.25	0.356	0.0
		p4	0.25	0.2	0.2
밀면이 정사각형인 사각뿔		p1	0.0	0.0	0.0
		p2	0.5	0.0	0.0
		p3	0.0	0.5	0.0
		p4	0.25	0.23	0.23

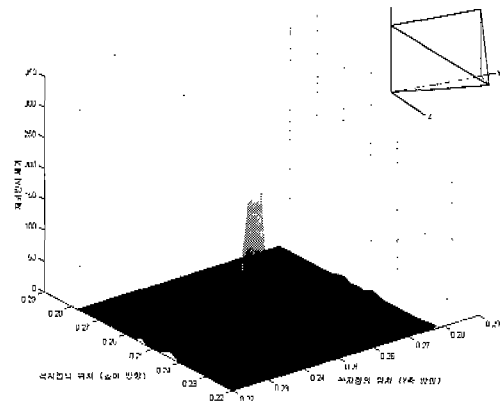


Fig. 9 The intensity of retroreflective light from a quadrangular pyramid with rectangular base

Table 2 Dimensions of retroreflectives with the highest light intensity

밀면이 정삼각형인 사면체				밀면이 이등변 삼각형인 사면체				밀면이 정사각형인 사각뿔			
정점	X	Y	Z	정점	X	Y	Z	정점	X	Y	Z
p1	0.0	0.0	0.0	p1	0.0	0.0	0.0	p1	0.0	0.0	0.0
p2	0.5	0.0	0.0	p2	0.5	0.0	0.0	p2	0.5	0.0	0.0
p3	0.25	0.433	0.0	p3	0.25	0.356	0.0	p3	0.0	0.5	0.0
p4	0.25	0.145	0.204	p4	0.25	0.175	0.178	p4	0.25	0.25	0.25

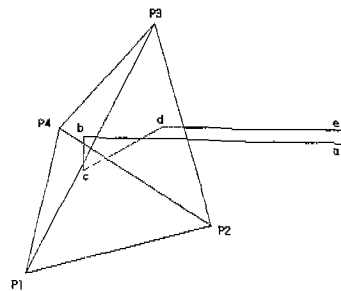
4.2 유효 면적 비

본 연구에서 개발된 프로그램으로 재귀 반사체에 입사된 광의 경로를 분석한 결과, 재귀 반사체에 입사된 빛이 모두 재귀 반사되지 않음을 알 수 있었다. 즉, 재귀 반사가 일어나는 빛은 사면체의 꼭지점을 공유하는 세 면을 차례로 부딪히면서 전반사를 일으키는 경우에만 빛의 손실이 거의 없이 재귀 반사된다. 예를 들어, Fig. 10 (a) 에서  $\overline{ab}$  선분을 따라 반사체의 P1-P2-P3 평면에 입사되어 투과된 빛은 반사체의 꼭지점을 포함하는 세 평면 P1-P3-P4, P1-P2-P4, P2-P3-P4 에서 연속적인 전반사를 일으켜 경로  $\overline{bc}$ ,  $\overline{cd}$  로 진행한 다음, 평면 P1-P2-P3를 투과하여  $\overline{de}$  경로로 진행하여 원래의 입사된 방향으로 회귀한다. 만약 입사된 빛이 반사체의 꼭지점을 포함하는 세 면을 차례로 부딪히지 않는 경우에는 다른 방향으로 반사되어 입사된 방향으로 되돌아가지 않는다. 예를 들어, Fig. 10 (b)에서와 같이  $\overline{ab}$  선분을 따라 반사체의 P1-P2-P3 평면에 입사되어 투과된 빛은 평면 P1-P3-P4, P1-P2-P4, P1-P2-P3 에서 연속적인 전반사를 일으켜 경로  $\overline{bc}$ ,  $\overline{cd}$  로 진행한 다음, 평면 P2-P3-P4를 투과하여  $\overline{de}$  경로로 진행하여 원래의 입사된 방향으로 회귀하지 않게 된다.

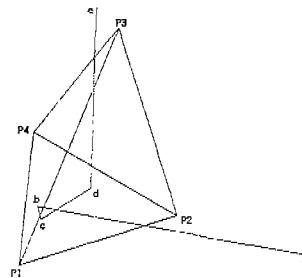
한편, 재귀 반사체에 입사되는 빛 중에서 어느 빛이 재귀 반사되는 지를 알기 위해, 충분히 많은

수의 광원을 반사체에 입사시킨 후 재귀 반사되는 빛의 경로를 분석하였다. 이를 위해 Fig. 11, 12, 13 과 같이 밀면이 각각 정삼각형, 이등변 삼각형, 그리고 정사각형인 반사체에 대해 재귀 반사가 일어나는 빛의 경로를 추적하였다. 그 결과, 입사된 빛이 반사체의 세 면을 차례로 부딪히면서 재귀 반사를 하는지의 여부는 빛이 재귀 반사체에 입사되는 위치에 따라서 결정됨을 알 수 있었다. 따라서 이러한 입사 위치의 영역이 넓을수록 그 반사체는 재귀 반사 효율이 좋다고 할 수 있다. 본 연구에서는 전술한 바와 같이 이를 ‘유효 면적비’라고 정의하였다.

본 연구에서 고려하고 있는 세 가지 형상의 경우에 대해서는, Fig. 11, 12, 13에서 알 수 있듯이 밀면이 정삼각형인 사면체의 경우가 ‘유효 면적 비’가 가장 크다는 것을 알 수 있으며, 밀면이 정사각형인 경우가 가장 적어 재귀 반사 효율이 적다는 것을 예측할 수 있었다.



(a) an incidence ray of retroreflection



(b) an incidence ray which are not retroreflecting

Fig. 10 The trace of a retroreflection ray from tetrahedral element



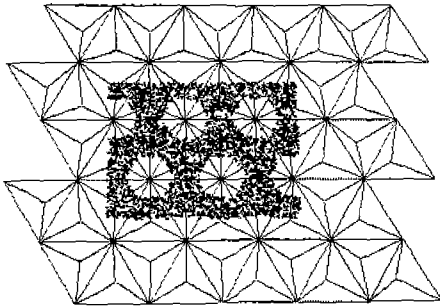


Fig. 11 The incidence distribution causing retroreflection from tetrahedron with a regular triangle base

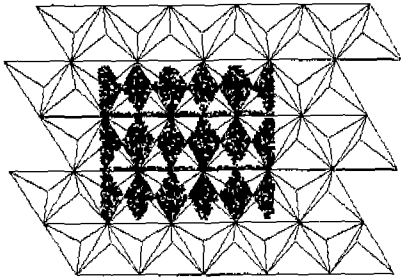


Fig. 12 The incidence distribution causing retroreflection from tetrahedron with an equilateral triangle base

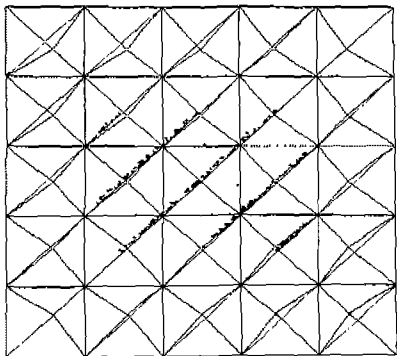


Fig. 13 The incidence distribution causing retroreflection from rectangular base

### 4.3 재귀 반사 성능 지수

앞의 소절에서 미국 FHWA 규정에 따라 모사하였을 때, 최고의 반사 강도를 나타내는 재귀 반

사체의 형상을 구하였는데, 재귀 반사체의 성능을 종합적으로 평가하기 위해서는 재귀 반사되는 빛의 강도뿐만 아니라 광원의 위치에 따라 재귀 반사 효율이 저하되지 않는 '재귀 반사 범위'도 함께 고려되어야 하겠다. 왜냐하면 재귀 반사의 강도가 높더라도 '재귀 반사 범위'가 좁다면 곡률이 심한 야간의 도로 상황에서 표지판을 볼 수 있는 운전자의 위치가 극히 제한되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 '재귀 반사 범위'를 함께 고려한 종합적인 재귀 반사체의 성능을 평가하는 기준을 새로이 제안하였다. 즉, '재귀 반사 범위' 내의 모든 반사 강도의 합으로 '재귀 반사 성능 지수'를 정의하고 이를 이용하여 각 반사체의 성능을 평가하고자 한다.

본 연구에서 제안한 '재귀 반사 성능 지수'로 반사체의 성능을 평가하기 위해서는 반사지로 들어오는 빛의 입사각을 변화시키면서 재귀 반사 강도의 분포를 구하면 된다. 이를 이용하여 본 연구에서 고려하고 있는 세 가지 형상에 대한 각각의 결과를 Fig. 14, 15, 16 에 나타내었는데, 그래프에서 나타난 형상의 체적이 가장 큰 경우가 '재귀 반사 성능 지수'가 가장 큰 경우이다. 앞의 소절의 Fig. 7 과 8 에서 재귀 반사 강도만을 고려하였을 때, 밀면이 이동면 삼각형인 반사체가 밀면이 정삼각형인 반사체 보다 재귀 반사 강도가 20% 정도 작은 값을 나타내었다. 그러나 '재귀 반사 범위'를 고려한 전체적인 '재귀 반사 성능 지수'로써 비교하면, Fig. 14 와 15에서 알 수 있듯이, 밀면이 이동면인 사면체가 정삼각형인 사면체 보다 뛰어난 성능으로 평가되었다.

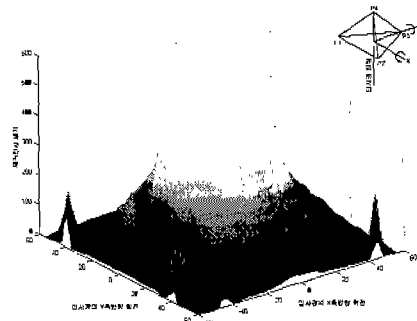


Fig. 14 Light intensity according to angular position of light sources for tetrahedral reflectives with regular triangle base

이상의 연구 내용을 종합하면, 본 연구에서 목적하는 최적의 반사체의 형상을 구하기 위해 제작 가능한 세 가지 반사체의 성능을 ‘최대 반사 강도’, ‘재귀 반사 범위’, ‘유효 면적비’, ‘재귀 반사 성능지수’에 따라 비교 평가하고 이를 Table 3에 정리하였다.

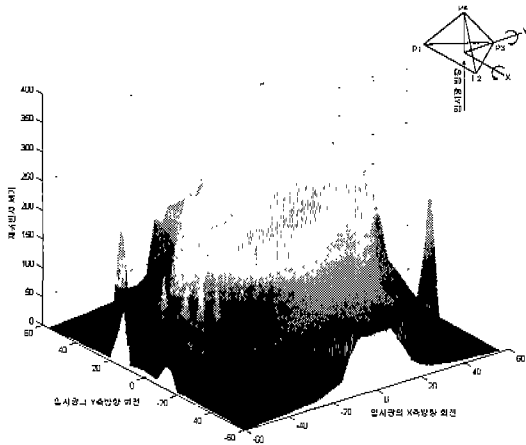


Fig. 15 Light intensity according to angular position of light sources for tetrahedral reflectives with equilateral triangle base

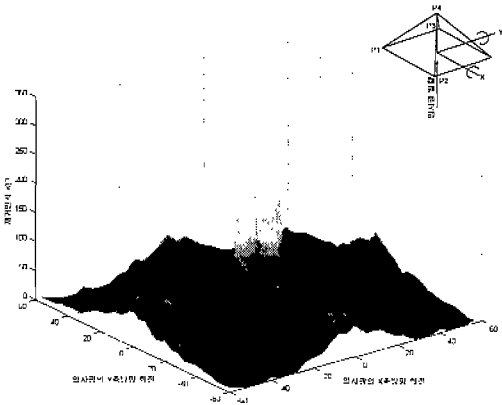


Fig. 16 Light intensity according to angular position of light source for reflectives with rectangular base

Table 3 Performance evaluation of each type of retroreflectives

반사체 항목	최대 재귀 반사 세기	재귀 반사 범위	유효 면적 비	재귀 반사 성능 지수
밀면이 정삼각형인 사면체	501.2	X축:-30~+30 Y축:-30~+30	66 %	9.6292 E4
밀면이 이등변 삼각형인 사면체	396.5	X축:-45~+45 Y축:-55~+55	61 %	1.1903 E5
밀면이 정사각형인 사각뿔	319.4	X축:-12~+12 Y축:-12~+12	6 %	1.2097 E4

### 5. 검토 및 결론

본 논문에서는 반사체의 형상에 따른 재귀 반사 성능을 분석하기 위해 재귀 반사 현상을 모사 하는 시뮬레이터를 개발하고, 이를 이용하여 최적의 재귀 반사체 형상 모델을 구할 수 있었다. 수행된 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다

첫째, 반사체의 밀면이 각각 정삼각형, 이등변 삼각형, 그리고 정사각형인 경우에 대해 그 꼭지점의 위치에 따른 재귀 반사의 강도를 정량적으로 구하였다. 그 결과 밀면이 정삼각형인 사면체가 최고의 반사 강도 값을 나타내었는데, 밀면이 이등변 삼각형인 사면체의 경우보다 약 25 %, 밀면이 정사각형인 경우보다 약 55 % 정도 큰 값을 나타내었다.

둘째, 세 가지 반사체의 각각의 형상에 대해 재귀 반사를 일으키는 빛의 입사 위치의 분포를 가시화하고, 이를 이용하여 각 형상에 대해 재귀 반사를 일으키는 ‘유효 면적 비’를 구하였다. 그 결과 밀면이 정삼각형인 사면체의 ‘유효 면적 비’가 가장 큰 값을 나타내었고, 밀면이 정사각형인 경우가 가장 적은 값을 나타내었다.

셋째, 최대 반사 강도와 유효 면적비를 고려하면, 밀면이 정삼각형인 반사체가 가장 우수한 특성

을 나타내었으나, 본 연구에서 제안한 '재귀 반사 범위'를 고려한 전체적인 성능지수인 '재귀 반사 성능 지수'로써 평가하면 밀면이 이등변 삼각형인 반사체가 가장 우수한 성능을 가진 것으로 평가되었다. 그리고 사각뿔인 반사체는 형상 치수의 변화에 대해 성능의 변화가 민감하지 않기 때문에 가공 정밀도의 제어가 용이한 장점을 제외하고는 모든 면에서 재귀 반사 성능이 저조하였다.

넷째, 고려 대상이 된 세 가지 반사체의 경우 모두 정점의 위치에 따른 형상 정밀도가 재귀 반사의 성능에 적극적으로 영향을 미친다. 즉 Fig. 7, 8, 9 에서 알 수 있듯이 재귀 반사 강도는 반사체 꼭지점의 높이의 변화에 더욱 민감하여, 한 변의 길이가 0.5 mm 인 반사체의 경우 높이 치수에 대한 공차는 2  $\mu\text{m}$  정도밖에 허용되지 않는다. 또한 재귀 반사가 일어나는 경로를 살펴보면, 입사되는 빛의 위치가 반사체의 꼭지점 주위인 경우만이 재귀 반사되고, 반사체가 서로 만나는 골 부근으로 입사되는 빛은 재귀 반사되지 않고 임의 방향으로 방사됨을 알 수 있다. 따라서 재귀 반사체의 꼭지점 부근의 정밀도가 전체 재귀 반사 성능에 결정적으로 영향을 미치므로 꼭지점 부분을 더욱 정밀하게 가공해야 한다.

### 후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소를 통하여 한국 과학 재단과 산업자원부의 지원으로 수행되었으며, 관계자들께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. Pricone et al., "Retroreflective sheeting," United States Patent 4672089, 1987
2. 이은호, "유리구슬형 재귀 반사기의 광학적 특성 해석," 한국정밀공학회지, 제 11권 제4호, pp. 165-173, 1994.
3. Benson, "Wide-angle-reflective cube-corner retroreflective sheeting, United States Patent 4703999, 1986.
4. 김덕영, "도로시설용 반사판," 대한민국특허, 10-1999-0021469, 1999
5. 최재영, "'재귀반사표면과 재귀반사체의 제조와

- 장치," 대한민국특허, 10-2000-000809, 2000.
6. 전관철, "물리광학," 신광출판사, pp. 140-148, 1991.
7. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, "Standard Specifications For Construction Of Roads And Bridges On Federal Highway Projects," pp. 750-762, 1996.
8. Heenan et al., "Retroreflective articles having microcubes, and tools and methods for forming microcubes," United States Patent 6015214, 1996.